

Study of the low-energy d+d reaction in liquid metals

著者	本多 佑記
号	75
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3074号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00121215

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	本多 佑記	提出年	平成 29 年
学位論文の 題 目	Study of the low-energy d+d reaction in liquid metals (液体金属中での低エネルギー d+d 反応の研究)		

論文目次

1 Introduction	
1.1 Nuclear reaction in dense plasmas	
1.2 Strongly coupled plasma in metal	
1.2.1 Anomalous enhancement of d + d reaction in metals	
1.2.2 Interpretation of enhancement	
1.2.3 Experimental uncertainty	
1.3 New method to determine screening potentials in metal	
1.4 The aim of this study	
2 Low-energy d + d reaction	
2.1 Cross section	
2.2 Screening effect	
2.3 Astrophysical S-factor	
2.4 Angular distribution	
2.5 Kinematics of d + d reaction	
2.5.1 Kinetic energy of emitted nuclei	
2.5.2 Solid angle ratio	
3 Coulomb scattering in matter	
3.1 Differential Cross section	
4 Cooperative colliding mechanism	
4.1 Reaction Process	
4.2 Thin-target yield	
4.3 Thick-target yield	
4.4 Realistic calculation	
4.4.1 Trajectory calculation	

4.4.2 Collision point

4.4.3 Total yield

4.5 Yield and energy spectra at laboratory frame

4.5.1 Yield

4.5.2 Energy spectra

4.5.3 Feature of the CCM spectra

5 Experiment

5.1 Beamline

5.1.1 Beam energy

5.1.2 Beam position

5.2 Reaction chamber

5.2.1 Target holder

5.2.2 Scraper

5.3 Experimental setup

5.3.1 Detector

5.3.2 Faraday cup

5.3.3 Thermometer

5.3.4 Target scanning system

5.4 Metal target

5.4.1 Stopping power

5.4.2 Target temperature

5.5 Solid angle

5.6 Data acquisition system

5.6.1 Block diagram for energy measurement

5.6.2 Block diagram for time and current measurement

6 Experimental results and analysis

6.1 Raw spectra

6.2 Background event

6.2.1 Thermal noise

6.2.2 Absorber background

6.3 Energy spectra

6.4 Yield

6.4.1 Integral region

6.4.2 Excitation function

7 Discussion

7.1 Results of experiment and calculation

7.1.1 Energy spectra

7.1.2 Yield

7.2 Screening potential

7.2.1 Interatomic potential dependence of screening potentials

7.2.2 Systematic uncertainty

7.2.3 Screening effect for CCM

7.2.4 Discussion about screening potential

7.3 Consideration about interatomic potential

7.4 Contribution of CCM to solid metal experiment

8 Conclusions

8.1 Future issue

Appendix

Calibration of the emissivity

Rest deuteron in the liquid metal

Absorber event

Energy calibration

Solid angle correction

Target height

【序論】反応核間のクーロン障壁よりも低いエネルギーでの核融合反応は、クーロン障壁をトンネル効果で透過することによって発生する。そのため、反応核の周囲に存在する荷電粒子によってクーロン障壁が緩和されると、透過確率が上昇し、核反応断面積が増大する。これは遮蔽効果と呼ばれている。金属内は伝導電子と金属イオンからなる低温高密度のプラズマであり、そこでの核反応は伝導電子による遮蔽効果によって約 30 eV のクーロン障壁の減少 (遮蔽ポテンシャル) が期待される。しかし、実際に測定された固体金属中での d+d 反応の増大率を説明するには数 100 eV の遮蔽ポテンシャルが必要とされ、伝導電子による遮蔽効果以外の核反応率増大効果の存在が示唆された。

金属中での核反応率増大を研究する一連の研究のなかで、我々の研究グループでは重陽子分子ビームに特有の d+d 反応を発見した。これに対して Cooperative Colliding Mechanism (CCM) を提唱し、それを定性的に説明した。CCM では、入射、標的重陽子は同一分子内の重陽子であり、並進している複数の重陽子のうち一つが金属原子との弾性散乱によりその軌道を変え、他の重陽子と衝突し核反応を起こす。CCM は反応収量を正確に計算することができれば、遮蔽効果を測定する良い手段となる。

本研究では D_3^+ ビームによる液体金属中での d+d 反応のデータ蓄積、CCM による d+d 反応のシミュレーションを開発し、分子ビームに特有な d+d 反応への理解を深め、CCM を利用した遮蔽ポテンシャルの導出を行った。また、過去の固体金属中での遮蔽ポテンシャル測定にも分子ビームは使用されている。そのため、CCM が核反応率の増大に寄与している可能性が考えられる。従って、その影響の評価を行った。

【実験】 $E = 10\text{--}60$ keV の D_3^+ ビームを液体金属標的 In, Pb, Sn, Bi に照射し d+d 反応から放出される proton, triton, 3He を Si 半導体検出器で測定した。全ての金属標的で同様なエネルギースペクトルが見られ、原子番号が近い金属標的同士 (In, Sn)、(Pb, Bi) の収量はほぼ同一であり、Pb 標的時の収量は In 標的時の 1.72 倍であった。

【シミュレーション】 D_3^+ ビームを金属に照射した時、正三角形(一辺 ~ 1 Å) に配置された 3 個の重陽子がほぼ同時に金属に入射する。それらの重陽子が金属原子との散乱によって作る金属中での軌跡を Monte Carlo 法で計算し、重陽子同士が衝突する時の運動量分布を得た。金属原子と重陽子の散乱は単純な Rutherford 散乱では記述できず、束縛電子による金属原子核の遮蔽を考慮する必要がある。物質中での原子・原子間のクーロンポテンシャルの記述方法は多数提案されており、本研究では Bohr, Moliere, ZBL model を試用した。

【考察】CCM を仮定したシミュレーションから得たエネルギースペクトルは幅や非対称性などの特徴が良く再現した。シミュレーションから得た収量は Bohr model を用いた計算収量が実験収量の絶対値を良く再現した。これらのことから、 D_3^+ ビーム照射による特異な d+d 反応を CCM で定量的に説明できることが確認された。収量の絶対値には原子間ポテンシャルのモデル依存性が見られ、計算されたエネルギースペクトルも実験値のピーク構造を再現しきれていない。これらの問題はより現実に近い原子間ポテンシャルの情報を得ることで、改善されることが期待される。Bohr model を用いた計算収量と実験収量の差を遮蔽効果による核反応率の増大であると考え、最適な遮蔽ポテンシャル U_s の算出を行ない、In, Pb, Sn, Bi に対してそれぞれ 170^{+30}_{-30} , $^{+110}_{-110}$, 0^{+10}_{-0} , $^{+60}_{-0}$, 250^{+20}_{-20} , $^{+190}_{-190}$, 0^{+10}_{-0} , $^{+120}_{-0}$ を得た。理論的には伝導電子による遮蔽から約 30 eV, 金属原子の束縛電子の偏極による遮蔽から約 30 eV の合

計 60 eV の U_s が予想され、本研究から得た遮蔽ポテンシャルは系統誤差の範囲で理論予想と一致する。つまり、未知のメカニズムによる増幅を導入しなくとも、電子による遮蔽効果で説明できる範囲である。

固体金属中での d+d 反応の測定に分子ビームが用いられた場合、その収量は静止重陽子との d+d 反応と CCM による d+d 反応の和となる。過去に報告された D_3^+ ビームを使用した固体 In 中での遮蔽ポテンシャルは 530 ± 20 eV であり、その重陽子密度は約 10^{21} cm^{-3} であった。その時、約 500 eV の遮蔽ポテンシャルを CCM によって誤認することが分かった。よって、その大部分を CCM で説明できる。従って、遮蔽ポテンシャル測定に分子ビームを使用した際には CCM の効果を考慮する必要がある。

【結論】 D_3^+ ビームによる液体金属中での特異な d+d 反応を CCM によって定量的に説明することに成功した。CCM を用いて推定された金属中での U_s は、過去の固体金属中での測定に対して非常に小さく、電子による遮蔽効果で理解できる値であった。また、過去に行なわれた分子ビームを用いた固体金属中での d+d 反応実験では数百 eV の遮蔽ポテンシャルの誤認が起こるため、CCM の効果を考慮する必要がある。

論文審査の結果の要旨

低エネルギー領域の原子核反応は、ビックバンや恒星内部での元素合成、核融合でのエネルギー生成等に密接に関連している。それ故、様々な環境下における反応断面積の測定が要求される。近年、金属中で数 keV 以下の領域まで測定が可能となった D+D 反応においては、裸の D+D 反応に較べて大きな反応率が報告され、伝導電子によるクーロン障壁の遮蔽効果が異常に大きい可能性が指摘されている。

本論文の著者は、液体金属への重陽子ビーム (D_3^+) 照射時に、分子ビームに特有な反応過程により D+D 反応が生じることを発見した。分子ビームを用いた場合、分子中の 1 個の D が液体金属のホスト原子と弾性散乱し、引き続き、同じ分子を構成しているもう 1 個の D と D+D 反応を起こす。著者はこの過程を Cooperative Colliding Mechanism (CCM) と名付け、本論文は、 D_3^+ ビームによる In, Sn, Pb, Bi の液体金属中での D+D 反応の系統的測定を行い、CCM による解析により D+D 反応の遮蔽ポテンシャルを初めて導出したものである。

著者は、固体金属中 D+D 反応実験においては、表面の標的重陽子密度の不定性を取り除くことが難しいが、液体金属と CCM の利用が遮蔽ポテンシャル導出の優れた方法であると予測し、本論文の目的が、分子ビームによる D+D 反応の系統的データと CCM 解析により、金属中の伝導電子による遮蔽ポテンシャルの導出にあると述べている。つぎに、金属中でのホスト原子による弾性散乱と CCM 過程を詳細に議論し、それに基づきモンテカルロプログラムを作成し、CCM 過程から予想される p と t のエネルギースペクトルと収量の励起曲線を導出した。また、10~60 keV の D_3^+ ビームを用い液体 In, Sn, Pb, Bi を標的とした反応実験について詳細に記述し、実験で得られたエネルギースペクトルと励起曲線の比較を行い、遮蔽ポテンシャルの導出を行った。原子散乱過程のポテンシャルとしていくつかのモデルが試されたが、実験値とのフィットが最良の Bohr のポテンシャルに基づき、遮蔽ポテンシャルが求められた。その結果、In, Sn, Pb, Bi について、各々、 $170(\pm 30 \pm 110)$ 、 $250(\pm 20 \pm 190)$ 、 $<10(\pm 0 \pm 60)$ 、 $<10(\pm 0 \pm 120)$ eV の値が得られた。これらの結果は、固体標的実験から得られている値、~500 eV と較べると、非常に小さいことを明確に示した。最後に、分子ビームを用いて固体金属を照射した場合、CCM 過程を考慮していない従来の解析では、低エネルギー領域における収量の CCM 過程に起因する増大を見落とすため、導出された遮蔽ポテンシャルは数 100 eV と大きな値をとる可能性を指摘した。

このように本論文の著者本多佑記は、低エネルギー原子核反応研究において、分子ビームを用いて液体金属を標的とした初めての実験を行い、低エネルギー核反応において、分子ビームの及ぼす効果について新たな知見を与えると共に、分子ビーム特有の CCM 過程を利用して In, Sn, Pb, Bi 中の伝導電子による遮蔽ポテンシャルを求めた。さらに、従来の固体標的実験では、導出されるポテンシャルの値が非常に高く評価される可能性を初めて明らかにした。以上のことは、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、本多佑記提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。